

Техніка і технології

УДК 622.276.1/6

ПІДВИЩЕННЯ ТАМПОНУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ДИСПЕРСНОЇ СИСТЕМИ У ТРІЩИНАХ ПЛАСТІВ

¹В.С. Бойко, ¹Р.В. Грибовський, ²Р.В. Бойко, ¹О.Р. Грибовський, ¹І.М. Купер

¹ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 994196,
e-mail: public@nuing.edu.ua

²УМГ "Львівтрансгаз", м. Львів, вул. Рубчака, 3, тел./факс (0322) 633233,
e-mail: Rvas256@gmail.com

Тампонуванням тріщин суспензією дисперсних матеріалів у нафтових пластах можна підвищити ефективність витіснення нафти водою (чи іншими розчинами активних домішок) за наявності тріщин у гірських породах нафтового покладу. Метою роботи є розробка і обґрунтування способів зниження проникності тампонувального шару і загалом тріщин шляхом використання суміші дисперсних систем різного типу (із різною плавучістю частинок) і фізико-хімічного (кислотного і теплового) діяння на частинки. Обґрунтування виконано на основі теоретичного та експериментальних досліджень. Окремо дисперсні системи із різною плавучістю частинок забезпечують тампонування 70-80% об'єму тріщин, і їх спільне застосування є ефективнішим в аспекті тампонування тріщин загалом. Для встановлення раціонального складу тампонажної суміші використано розроблену нами модель деформованої тріщини. З метою зменшення проникності тампонувального шару експериментами обґрунтовано доцільність запобігання ще й кислотного розчину, який екзотермічно взаємодіє з одним із компонентів, а теплота впливає на деформацію другого компонента (тут забезпечується, окрім ізоляції припливу води, ще й термокислотне оброблення матриці гірської породи). У випадку ізоляції припливу води проникність тампонувального шару зменшується у 56 разів, а у випадку комплексного діяння – у 76 разів.

Ключові слова: розробка нафтових родовищ, тріщинуватість колектора, тампонування тріщин, дисперсні системи.

Тампонируванием трещин суспензией дисперсных материалов в нефтяных пластах можно повысить эффективность вытеснения нефти водой (или иными смесями активных примесей) при наличии трещин в горных породах нефтяного пласта. Цель работы – разработка и обоснование способов снижения проницаемости тампонирующего слоя и вообще трещин путем использования смеси дисперсных материалов разного типа (с разной плавучестью частиц) и физико-химического (кислотного и теплового) воздействия на частицы. Обоснование выполнено на основе теоретических и экспериментальных исследований. Отдельно дисперсные системы с разной плавучестью частиц обеспечивают тампонирувание 70-80% объема трещин вообще. Для установления рационального состава тампонирующей смеси использовано разработанную нами модель деформирующейся трещины. С целью уменьшения проницаемости тампонирующего слоя экспериментами обосновано целесообразность закачки еще и кислотного раствора, который экзотермически взаимодействует с одним из компонентов, а теплота влияет на деформацию другого компонента (здесь обеспечивается, кроме изоляции притока воды, еще и термокислотное воздействие на матрицу горной породы). В случае изоляции притока воды проницаемость тампонирующего слоя уменьшается в 56 раз, а в случае комплексного воздействия в – 76 раз.

Ключевые слова: разработка нефтяных месторождений, трещиноватость коллектора, тампонирувание трещин, дисперсные системы.

The fractures plugging with the help of dispersible materials suspensions in oil layers can improve the efficiency of water-oil displacement (or displacement by other solutions of active admixtures) when there are fractures in oil-bearing rocks. The aim of the study is to develop and reason ways of permeability reduction of the plugging layer and fractures in general by using mixtures of dispersible systems of different types (with different buoyancy of particles) and physical and chemical (acidic and thermal) influence on particles. The reasoning has been done on basis of theoretical and experimental studies. The dispersible systems with different buoyancy of particles provide plugging of 70-80% of the fractures volume, and their joint usage is more effective in the aspect of fractures

plugging in general. To determine efficient composition of the plugging mixture the developed model of a deformed fracture has been used. It has been reasoned by the experiments that acid solution can be used to decrease the permeability of the plugging layer. The acid solution interacts with one of the components exothermally, and the heat influences the deformation of another component (except for the isolation of water flow, thermal and acidic treatment of rock matrix are provided). In case of water flow isolation the permeability of the plugging layer is 56 times bigger and in case of complex treatment it is 76 times bigger.

Key words: oilfield development, fracture plugging, dispersible systems.

Вступ. Основним і найбільш ефективним методом розробки родовищ вуглеводнів є видобування їх при штучному водонапірному режимі [1, 2]. Але колекторам нафтових і газових покладів у багатьох випадках притаманна чітко виражена тріщинуватість, а відповідні їй тріщини, як найбільш високопроникні канали, зокрема порівняно із порами, зумовлюють передчасні проривання води до видобувних свердловин [3], унеможливають ефективне діяння на матрицю гірської породи, наприклад, кислотним розчином при термохімічному діянні на привибійну зону [4], що істотно погіршує техніко-економічні показники процесу розробки покладів і видобування вуглеводнів [3]. Зменшити шкідливий вплив тріщинуватості на ці процеси можна шляхом тампонування таких тріщин [5].

Аналіз сучасних досліджень. Для короткотривалого чи постійного тампонування високопроникних тріщин запропоновано використовувати різні ізоляційні (тампонувальні) матеріали, але найбільш придатними є дисперсні матеріали на водній або вуглеводневій основі (суспензії, дисперсії), а серед них гранульований магній чи піщано-магнієва суміш [5]. Рідинні ізоляційні матеріали проникають як у тріщини будь-якого розкриття, так і в пори, створюючи там певний тампон, а суспензії можуть надходити тільки в тріщини, що залежить від співвідношення дисперсності (розмірів) твердих частинок до поперечного розкриття тріщин [6]. Ці питання висвітлено в ряді публікацій й узагальнено в монографії [5].

Виділення невирішених питань. Невирішеним залишається питання зменшення проникності тампонуального шару (бар'єру) в тріщинах, оскільки тампонувальний шар представлений зернистим матеріалом, який ущільнюється в основному тиском змикання тріщин.

Мета роботи. За мету роботи ставиться задача розробити спосіб зменшення проникності тріщин шляхом використання дисперсних систем із різною плавучістю та фізико-хімічним діянням на них.

Висвітлення основного матеріалу. Наповнювання тріщин дисперсним матеріалом забезпечується запомповуванням у свердловину, а потім у пласт суспензії дисперсних частинок, а відтак досягається утворення тампонуального шару в тріщинах.

У даній роботі стосовно до відомих тампонувальних дисперсних систем із додатною седиментацією чи, просто седиментацією (перший компонент) або, інакше, із від'ємною плавучістю (наприклад, гранульованого магнію і піщано-магнієвої суміші) обґрунтовано і запропоновано використовувати дисперсні системи

із різною плавучістю, тобто в додаток до названих систем використовувати дисперсні системи із додатною плавучістю, зокрема подрібнений пом'якшувач чи бітумний структураторувач (другий компонент), котрі колюматують тріщини. Дослідження щодо підвищення тампонуальної здатності дисперсної системи, якою заповнюються тріщини, виконано експериментально із теоретичним обґрунтуванням.

Процес утворення (накопичення) зернистого шару в тріщині розглядаємо як сумарний результат двох явищ – колюматції і деколюматції. Під колюматцією розуміємо концентрування гранул у зернистому шарі (намівання шару) в результаті самовільного їх переходу (спливання, осідання) з об'єму дисперсної системи, а під деколюматцією – зворотний процес (розмивання шару потоком).

Априорі припускаємо, що інтенсивність намівання товщини шару є пропорційною питомій витраті $w_0\phi$ гранул, яка припадає на одиницю площі поперечного перерізу потоку у вертикальному напрямі (швидкості седиментаційного потоку), і об'ємною недонасиченню тріщини зернистим шаром $(1 - \zeta)$, а інтенсивність розмивання шару – початковій швидкості потоку u_0 ($u_0 = q/(\eta_0\delta)$) і насиченості тріщини шаром ζ , де ϕ – концентрація гранул у суспензії; w_0 – швидкість седиментації частинки; q – об'ємна витрата в тріщині суспензії; η_0 – початкова висота прямокутної вертикальної тріщини; δ – розкриття (ширина) тріщини; ζ – насиченість тріщини зернистим шаром на одиниці її довжини (об'ємна частка шару в тріщині).

Підсумовуючи алгебраїчно ці інтенсивності, завдяки дії двох протилежних процесів, одержуємо диференціальне рівняння (модель) кінетики утворення зернистого шару в тріщині (колюматції тріщини):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{a_1 w_0 \phi}{3_0} (1 - \zeta) - \frac{a_2 u_0}{3_0} \zeta, \quad (1)$$

або в безрозмірному вигляді:

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial \pi_3} = a_1 (1 - \pi_1) - a_2 \pi_1 \pi_2 \quad (2)$$

чи

$$\frac{1}{a_1} \frac{\partial \pi_1}{\partial \pi_3} = 1 - (1 + a_2 \pi_2) \pi_1, \quad (3)$$

$$\text{де } \frac{\partial \zeta}{\partial t} = \eta_0 \frac{\partial h}{\partial t};$$

t – час формування шару;

h – висота зернистого шару;

a_1, a_2 – постійні дослідні коефіцієнти;

$$\pi_1 = \zeta = \frac{h}{\eta_0}; \pi_2 = \frac{u_0}{w_0 \varphi}; \pi_3 = \frac{w_0 \varphi t}{\eta_0}; a_3 = \frac{a_2}{a_1}. \quad (4)$$

Величини π_1 і π_2 є симплексами відповідно геометричної і фізичної подібностей, а π_3 – критерієм гомохронності. Введення емпіричних коефіцієнтів у модель викликано феноменологічним підходом, що є звичайним у гідродинаміці в'язких рідин і суспензій. Згідно з початковою умовою $\pi_1 = 0$ при $\pi_3 = 0$ (або $\zeta = 0$ при $t = 0$) розв'язок лінійного рівняння (3) для елемента тріщини (зміна концентрації φ відбувається вздовж тріщини) набуває вигляду:

$$\pi_1 = (1 + a_3 \pi_2)^{-1} \{1 - \exp[-a_1 \pi_3 (1 + a_3 \pi_2)]\}. \quad (5)$$

Стосовно або щодо моделювання процесу в елементі тріщини, коли $q = \text{const}$, $\delta = \text{const}$, $\varphi = \text{const}$, $w_0 = \text{const}$, маємо $\pi_2 = \text{const}$. Тоді за експериментальними даними залежності π_1 (π_3) при $\pi_2 = \text{const}$ стосовно до суспензії пом'якшувача у воді згідно із (5) знайдено $a_1 = 1,84$, $a_3 = 3,9 \cdot 10^{-4}$, $a_2 = 7,2 \cdot 10^{-4}$ [7].

Модель (5) ми доповнили на основі експериментальних досліджень із заповнення (закріплення) вертикальних тріщин піском, котрий характеризується додатньою седиментацією у воді (осідання), які стосовно до гідророзриву продуктивного пласта виконано в роботах [8, 9, 10], а залежність процесу намівання шару піску подано від гідравлічної потужності потоку [10] (добуток витрати і динамічного коефіцієнта в'язкості дисперсійного середовища). Дослідами встановлено, що в практично можливих умовах “здійснення гідророзриву тривалість росту нерухомого шару до критичної величини (припинення росту), обчислюється хвилинами і десятками хвилин; тому в більшості випадків за час проведення фактичної операції гідророзриву цілком досягаються критичні умови” [9] (переклад наш). Результати цих дослідів Ю.В. Желтовим представлено для критичних (тобто рівноважних) умов у безрозмірних величинах (у наших позначеннях):

$$\pi_{1\text{кр}} = \frac{h_{\text{кр}}}{\eta_0}; \pi'_2 = \frac{q_p \mu_p}{\Delta \rho g \delta \eta_0^3}; \varphi; \pi_4 = \frac{d}{\delta}, \quad (6)$$

де $h_{\text{кр}}$ – критична (рівноважна) висота (товщина) намітого шару;

q_p – об'ємна витрата рідини (дисперсійного середовища);

μ_p – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини;

$\Delta \rho$ – різниця густин частинок піску і рідини;

g – прискорення вільного падіння;

d – середній ефективний діаметр зерен піску.

Комплекс π'_2 ми перетворили до вигляду:

$$\begin{aligned} \pi'_2 &= \frac{q(1-\varphi)}{\delta \eta_0} \frac{d^2}{g d^2 \Delta \rho \cdot 18 \eta_0^2} = \frac{u_0(1-\varphi)}{w_0(1-\varphi)^{-n}} \frac{d^2}{18 \eta_0^2} = \\ &= \frac{u_0}{w_0} \frac{d^2(1-\varphi)^{n+1}}{18 \eta_0^2} = \pi_2 \frac{d^2 \varphi(1-\varphi)^{n+1}}{18 \eta_0^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

де

$$q_p = q(1-\varphi); u_0 = \frac{q}{\delta \eta_0}; w_0 = w_{\text{ст}}(1-\varphi)^n; w_{\text{ст}} = \frac{g d^2 \Delta \rho}{18 \mu_p}$$

– швидкість седиментації за Стоксом (одинокі частинки);

n – показник степені за П.В. Лященком, що враховує стиснене осідання частинок (за даними різних авторів у залежності від режиму обтікання частинок рідиною величина n змінюється в межах 2,25–4,8) [11].

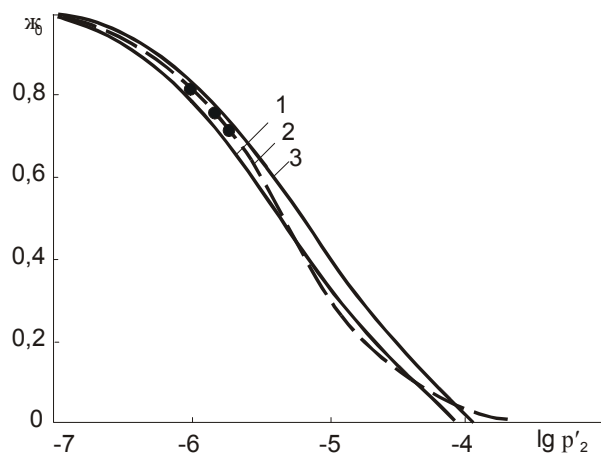
У роботах [8, 9, 10] введено також параметр $\pi_4 = d / \delta$, а ми припускали, що $d \ll \delta$. Введемо в нашу модель параметр π_4 . Аналізуючи рис. 2 і 3 роботи [8] із урахуванням роботи [10], приходимо до висновку, що задовільне співпадання ліній для різних π_4 при однакових значинах φ досягається, якщо значину параметра π'_2 із рис. 3 помножити на π_4' / π_4'' і лінії перенести на рис. 2, де π_4' і π_4'' – значини симплексу π_4 , які дорівнюють відповідно 0,1565 (для рис. 2) і 0,0745 (для рис. 3). Це уможливило нам записати уточнений параметр (симплекс структурної подібності)

$$\pi''_2 = \pi'_2 \frac{0,1565 \delta}{d} \quad (8)$$

або

$$\pi''_2 = \pi_2 \frac{0,1565 \delta d \varphi (1-\varphi)^{n+1}}{18 \eta_0^2}. \quad (9)$$

Тоді експериментальні дані [7] нами були перераховані при $n = 4$ по параметру π_2'' і перенесені на графік роботи [8]. Цей графік відтворюється на рис. 1, на який додатково нанесено пунктирну лінію, що побудована згідно з нашим



1 – 0,002-0,004; 2 – 0,00209; 3 – 0,004-0,006.

(Суцільні лінії перенесено із роботи [8] з експериментального вивчення закріплення вертикальної тріщини піском; пунктирну лінію побудовано згідно із рівнянням (5), вона включає експериментальні точки стосовно пом'якшувача)

Рисунок 1 – Залежність рівноважної насиченості ζ_0 тріщини зернистим шаром від критерію π'_2 для різних значин концентрації φ потоку

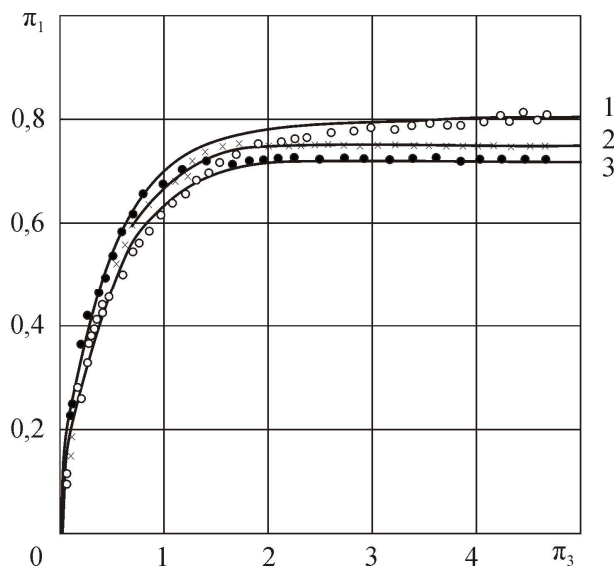


Рисунок 2 – Кінетика намівання шару дисперсної фази в тріщині при різних значеннях параметра π_2 : 657 (1); 922 (2); 1078 (3). Лінії проведено за рівнянням (5)

рівнянням (5), перераховано в координатах роботи [8] і містить у собі експериментальні точки стосовно до пом'якшувача. Лінії 1, 2, 3 відповідають концентрації потоку, яка дорівнює 0,002-0,004; 0,0029 і 0,004-0,006. Рух тільки таких малоконцентрованих суспензій є можливим у пористих і тріщинуватих середовищах [7]. На основі цього твердження нами встановлено задовільне співпадання результатів роботи [7] з експериментальними даними робіт [8, 10], які одержано для рівноважних умов намівання піску (матеріал із додатньою седиментацією),

чим підтверджено кінетичну модель (5). Отже, в доповнення до відомих досліджень обґрунтовано новий симплекс структурної подібності, що враховує співвідношення діаметра частинок і розкриття тріщин. Це дало змогу досягнути задовільного співпадання експериментальних даних роботи [7] із даними робіт [8, 9, 10] при рівноважних умовах і розширити область застосування рівняння кінетики кольматації тріщин (5).

Модель кінетики кольматації тріщини перевірено експериментально на фізичній моделі із використанням водної суспензії пом'якшувача [7]. Критерії подібності процесу кольматації виводили як на основі диференціального рівняння кінетики, так і з допомогою теорії розмірностей. Згідно з π -теоремою процес можна описати трьома безрозмірними комплексами π_1, π_2, π_3 , записаними вище. Експерименти із плануванням трифакторного експерименту і перевіркою адекватності адаптації отриманого рівняння за критерієм Фішера підтвердили встановлену модель кольматації (рис. 2). Деяке розкидання точок пояснюємо гідравлічною класифікацією гранул (розподіленням на фракції) і пов'язаною з нею необхідною заміною суспензії в ході експерименту, а також флотаційним ефектом, що зумовлений гідрофобністю поверхні частинок пом'якшувача і не піддається строгому контролю.

Аналіз свідчить, що припинення росту товщини шару пом'якшувача біля покрівлі тріщини (рівноважні умови) настає при відносній товщині його $\pi_1 = 0,7-0,8$ (залежно від швидкості потоку суспензії u_0 і концентрації суспензії ϕ), тобто 30-20% висоти (теж об'єму) тріщини залишається незаповненою пом'якшувачем.

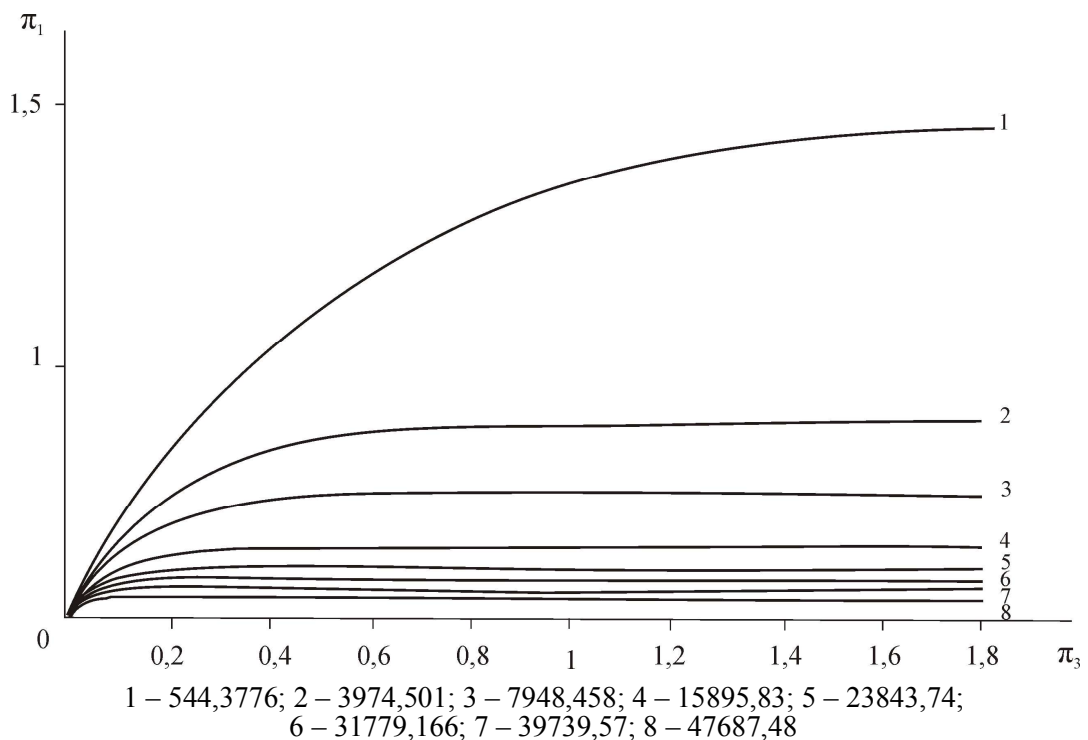
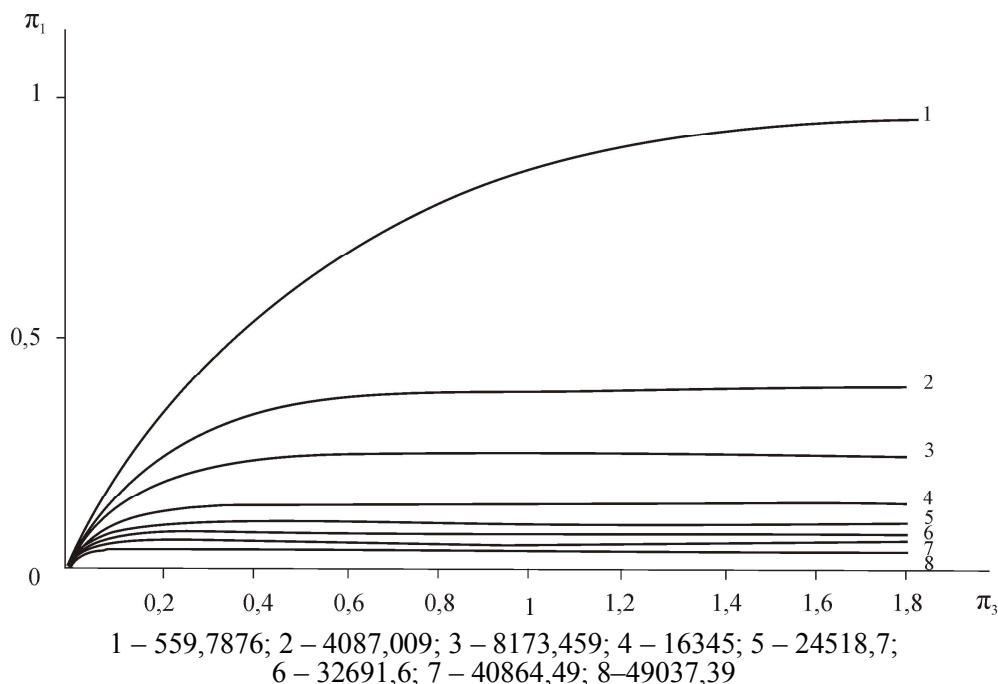


Рисунок 3 – Залежність π_1 від π_3 для гранульованого магнію при різних значеннях π'_2

Рисунок 4 – Залежність π_1 від π_3 для піску при різних значеннях π'_2

Додатньою седиментацією (осіданням частинок) характеризується ряд інших дисперсних матеріалів. Тут аналіз виконано на прикладі гранульованого магнію і піщано-магнієвої суміші. Суспензіям гранульованого магнію і піщано-магнієвої суміші (на воді, нафті, дизпаливу) притаманна додатня седиментація. Зрозуміло, що подібне заповнення (але біля підосви тріщини) буде спостерігатися і при запоповуванні в тріщину суспензії гранульованого магнію чи піщано-магнієвої суміші.

Для вивчення кінетики намівання шару гранульованого магнію і піску виконано розрахунки на комп'ютері за рівнянням (5). Середній „ситовий” діаметр частинок, розрахований як середньозважений по масах фракцій, становив відповідно для магнію і піску 1,04 і 1,08 мм, а модальний – 1,2 і 1,0 мм. Експериментами встановлено середньозважені по фракціях швидкості осідання (седиментації) частинок магнію у воді і гасі $w_{ом} = 0,089$ м/с, $w'_{ом} = 0,105$ м/с і відповідно частинок піску $w_{оп} = 0,129$ м/с, $w'_{оп} = 0,139$ м/с. Густини і коефіцієнти динамічної в'язкості відповідно для води і гасу становили 1000 кг/м³, 1 мПа·с і 819 кг/м³, 1,49 мПа·с; густини матеріалів гранул (частинок) відповідно магнію і піску – $\rho_{гм} = 1740$ кг/м³; $\rho_{гп} = 2600$ кг/м³. Для розрахунку за рівнянням (5) брали: швидкості седиментації $w_{ом} = 0,089$ м/с і $w_{оп} = 0,129$ м/с; розкриття тріщини $\delta = 2,4 \cdot 10^{-3}$ м; концентрації $\phi_m = 0,01724$ м³/м³ і $\phi_p = 0,01154$ м³/м³ (40 кг/м³); висоту тріщини $\eta_0 = 0,5$ м. Часом t задавались, щоб забезпечити отримання рівноважних умов. Витрату суспензії брали у відповідності із робочою продуктивністю від 1 до 10 насосних агрегатів, тобто від $14,6 \cdot 10^{-3}$ м³/с до 0,146 м³/с. Результати розрахунків стосовно магнію і піску відповідно подано на рис. 3, 4. Аналіз свідчить, що намівання рівноважного шару триває

40200 с (11,2 год.), а відносна товщина його становить 0,7-0,8.

Таким чином, при використанні суспензії гранульованого магнію або піщано-магнієвої суміші теж 20-30% висоти (або об'єму) тріщини залишається незаповненою тампонувальним шаром.

Рівноважні умови намівання описуються рівнянням, яке випливає із (5) при $\pi_3 \rightarrow \infty$ (чи $t \rightarrow \infty$):

$$\pi'_1 = \frac{1}{1 + a_3 \pi_2} \quad (10)$$

або з урахуванням діяння стінок тріщини (див. вище)

$$\pi'_1 = \frac{1}{1 + a_3 \pi_2''}, \quad (11)$$

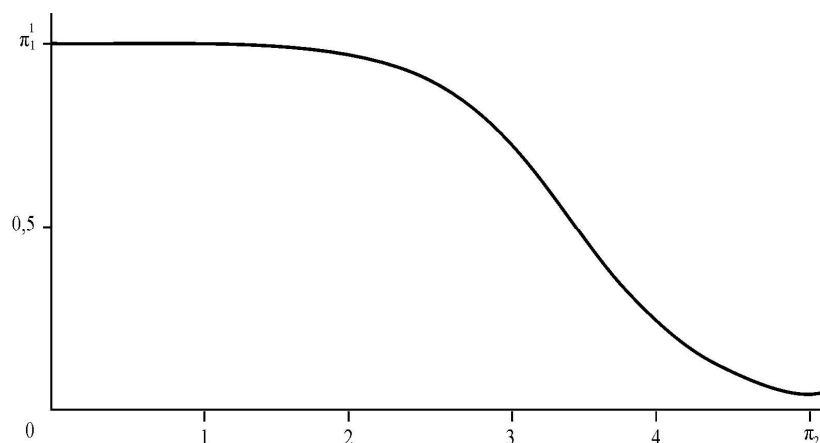
де $\pi'_1 = \frac{h_{кр}}{\eta_0}$;

$h_{кр}$ – критична (рівноважна) товщина шару;

$$\pi_2'' = \pi_2 \frac{0,1565 \delta d \phi (1 - \phi)^{n+1}}{18 \eta_0}.$$

Результати розрахунків для прийнятих вище вхідних даних і $d_{гм} = 1,04$ мм, $d_{гп} = 1,08$ мм подано на рис. 5 (залежності в білогарифмічних координатах $\pi'_1 - \lg \pi_2$ і $\pi'_1 - \lg \pi_2''$). Ці дані свідчать про те, що ступінь заповнення тріщини може змінюватися від 0 до 1 залежно від π_2 (або π_2''), тобто в залежності від швидкості руху суспензії та її концентрації. Це визначає шляхи керування процесом.

Звідси формулюється суть способу тампонування тріщин пласта дисперсними матеріалами з різною плавучістю [11]. Суть способу полягає в тому, що з метою підвищення ефективності оброблення привибійної зони об-

Рисунок. 5 – Залежність π'_1 від π_2 (або π''_2)

водненого пласта за рахунок зниження проникності обводнених тріщин, одночасно із запомпуюванням суміші піску і гранульованого магнію в рідині-носії або безпосередньо за нею в пласт запомпуюють гранульований асфальтено-смолистий пом'якшувач чи бітумний структуроутворювач за об'ємного співвідношення кількості суміші піску і гранульованого магнію до кількості пом'якшувача чи структуроутворювача (70-79) : (30-21). Спосіб за таким варіантом є ефективнішим.

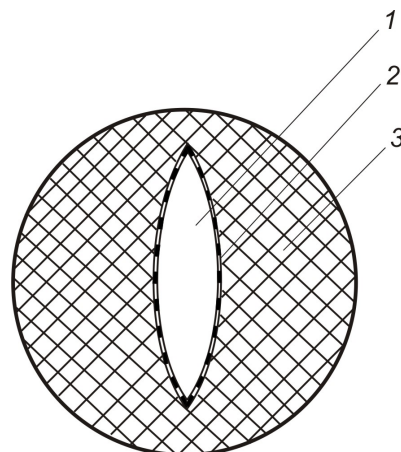
При кислотному обробленні привибійної зони із використанням, наприклад, піни вдається отримати тільки короткотривалий ефект „тампонування” високопроникних каналів на період запомпювання кислоти в пласт. Тому для постійного тампонування нами запропоновано інший спосіб, який може застосовуватися не тільки для обмеження припливу води, але і при комплексному термохімічному діянні на обводнені інтервали розрізу нафтового пласта.

Суть способу полягає в тому, що після запомпювання рідини розриву одночасно із запомпюванням магній-піщаної суспензії чи послідовно, не перериваючи процесу, перед вилученням рідини-розриву і рідини-носія в тріщини запомпуюють подрібнений пом'якшувач чи бітумний структуроутворювач. Частинки цих додаткових матеріалів (пом'якшувача, структуроутворювача) у воді під час запомпювання у вертикальну тріщину спливають і накопичуються у верхній частині (матеріали з додатною плавучістю), а частинки піску і гранули магнію, навпаки, осідають і накопичуються в нижній частині (матеріали з від'ємною плавучістю). У разі спільного чи послідовного запомпювання цих матеріалів заповнюється весь поперечний переріз тріщини. Слід відмітити, якщо все ж таки наявною є залишкова проникність шару цих матеріалів у тріщині, то в ході взаємодії магнію із соляною кислотою (при комплексному термохімічному діянні) підвищується температура, розм'якшується пом'якшувач чи структуроутворювач, проникність тріщини зменшується. У разі наявності крапельок нафти в потоці води під час експлуатації свердловини ці матеріали набухають у нафті, тим самим проникність тріщини змен-

шується. Ці припущення підтверджені наступними експериментами.

Для експериментального обґрунтування складу тампонажної суміші дисперсних матеріалів з різною плавучістю виникла потреба у створенні адекватної фізичної моделі тріщини. Відомі моделі тріщинуватої гірської породи, котрі утворені або породою, яка розколота на окремі секції, або набором кусків пісковика з різними коефіцієнтами проникності, або сталевими секціями, заповненими піском, і т. д. У таких моделях немає змоги вивчати защемлення частинок тампонажних матеріалів у тріщинах, а змодельовані тріщини не піддаються деформації.

Нами запропоновано спосіб моделювання деформівних тріщин із дископодібною формою в перерізі [12]. Матрицю пласта виготовлено залежно від мети дослідження із непроникної пружної гуми або за способом Ю.П. Желтова із пористого і проникного каучуку, а тріщину створено дископодібною і армовано непроникним або перфорованим каркасом. Загалом отримується або чисто тріщинний елемент пласта, або тріщинувато-пористий (рис. 6).



1 – тріщина; 2 – каркас непроникний (латунний) або перфорований; 3 – непроникна пружна гума або пористий і проникний каучук

Рисунок 6 – Схема моделі дископодібної тріщини пласта в непроникному або пористому середовищі

Для виконання експериментів щодо способу обмеження припливу води із використанням дисперсних матеріалів змоделивали тріщину в гумовому циліндрі діаметром 28 мм і армували латунним каркасом. Максимальне розкриття тріщини 2,4 мм, висота 24 мм, довжина 42 мм. Таку модель ми використали для обґрунтування співвідношення за об'ємами піщано-магнієвої суміші з іншими дисперсними системами з метою зниження коефіцієнта залишкової проникності тріщини. В даній статті відображено, що в разі намівання шару піщано-магнієвої суміші у вертикальну тріщину висота шару в тріщині становить 70-80% загальної висоти тріщини в залежності від співвідношення швидкості суміші в тріщині і швидкості седиментаційного потоку. При запомповуванні дисперсної системи із від'ємною седиментацією (водна суспензія або гранульованого асфальтено-смолистого пом'якшувача, або бітумного структуроутворювача, або поліетилену) має місце аналогічне явище, тільки накопичення відбувається у верхній частині тріщини, а нижня – вільна. При спільному запомповуванні дисперсних матеріалів із різною седиментацією ступінь заповнення тріщини підвищується.

У піщано-магнієвій суміші основним тампонувальним матеріалом з додатньою плавучістю є гранульований магній, який в результаті гідролізу або внаслідок своєї пластичності здатний утворювати тампон. Пісок слугує наповнювачем, котрий зменшує витрату магнію. Тому стосовно способу тампонування тріщин дисперсними матеріалами з різною плавучістю необхідно спочатку обґрунтувати раціональне співвідношення магнію і піску в тампонувальній суміші, за якого шар стає непроникним.

Можливими є чотири форми заповнення тріщин магнієм і піском у процесі внутрішньопластового обмеження водоприпливу: багатшарове однорідне укладання; моношарове однорідне укладання; укладання окремими однорідними порціями кожного компонента; неоднорідне укладання. Зіставляючи об'єми гранул магнію або продуктів його гідролізу із урахуванням різних видів ущільнення, встановлено, що при звичайному перемішуванні гранул магнію і частинок піску в змішувачі піскозмішувального агрегата і наявності навантаження, яке стискує тріщину ймовірним є утворення в тріщинах пласта багато- або моношарового укладання, тому слід брати масовий вміст магнію в суміші з піском $\phi = 0,15$, при цьому буде забезпечено повне закупорювання тріщин із деяким запасом. За відсутності навантаження, яке стискує тріщину, доцільно збільшити частку магнію в суміші до $\phi = 0,2$ [5].

Формування практично непроникного тампона за даними експериментів [13] відбувається протягом 48-60 год. Експерименти показали, що чим меншою є частка магнію, тим довша тривалість часу необхідна для формування непроникного тампона. Вважається, що це пов'язано із наявністю щілин між частинками піску і спресованого магнію, утрудненим надходженням води в них і запізнюванням гідролізу.

У керівному галузевому документі [13] рекомендується брати $\phi = 0,15-0,5$ на основі експериментів, представлених у цій роботі на рис. 3.6. Однак рис. 3.6 роботи [13] не можна вважати представницьким, оскільки в інтервалі від $\phi = 0,1$ до $\phi = 1,0$ відсутні експериментальні дані. Тому, виходячи із фізично обґрунтованих теоретичних розрахунків з метою економії гранульованого магнію без погіршення тампонувальних властивостей піщано-магнієвої суміші, рекомендуємо брати $\phi = 0,15$ і за відсутності стискувального тріщину навантаження $\phi = 0,2$.

Лабораторними дослідженнями встановлено оптимальне співвідношення піщано-магнієвої суміші і пом'якшувача (структуроутворювача), при якому досягається мінімальна значина коефіцієнта проникності тампонувального шару. Величина коефіцієнта проникності тріщин визначалась на описаній вище деформівній моделі пласта, що має в перерізі еліпсоподібну (дископодібну) тріщину.

Проведено два етапи дослідів стосовно комплексного внутрішньопластового термокислотного оброблення (КВПТКО) обводненої свердловини. У створену модель тріщини засипали піщано-магнієву суміш (співвідношення магнію і піску в піщано-магнієвій суміші становило 80% піску та 20% магнію) і помістили в кернотримач устаткування УДПК-1М. Наситили модель тріщини технічною водою, створили тиск гідрообтискання 4,0 МПа і визначили коефіцієнт проникності по воді, який становив 65,6 мкм², за тиску пропомповування 0,01 МПа.

Відтак модель тріщини залишили в спокої на 72 години для гідролізу магнію, після чого за тиску пропомповування 0,03 МПа коефіцієнт проникності по воді становив 40,5 мкм², тобто зменшився в 1,62 рази.

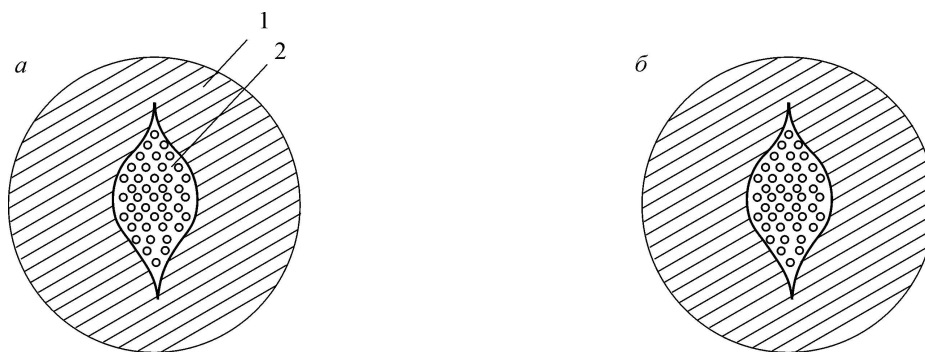
Відтак пропомпували через модель тріщини 40 мл 15% розчину соляної кислоти і залишили на добу для проходження реакції. Через добу визначили коефіцієнт проникності по воді, який становив 32,1 мкм² (рис. 7).

У другій серії дослідів тріщину заповнили піщано-магнієвою сумішшю (співвідношення мас у процентах піску і магнію 80:20) і пом'якшувачем (або структуроутворювачем). Кількість пом'якшувача брали 10-40%.

При тому ж тиску гідрообтискання коефіцієнт проникності по воді, коли суміші і пом'якшувача було взято у співвідношенні 7:3, становив 1,14 мкм², а через 72 год. – 0,72 мкм², тобто зменшився в 1,58 рази.

Потім через модель, як і в першому етапі дослідів, пропомпували 40 мл 15% розчину соляної кислоти HCl і залишили на 24 год. для реагування. Після цього коефіцієнт проникності по воді зменшився і становив 0,53 мкм². Тиск пропомповування на початку дослідів був 0,1 МПа, а в кінці – 0,24 МПа.

Зіставлення між результатами за способами ізоляції із використанням тільки піщано-магнієвої суміші і за двома способами із використанням суміші піску, магнію та пом'якшувача окремо ізоляція припливу та комплексне діяння – комплексне внутрішньопластове тер-



Співвідношення пісок: Mg = 8:2,
 1) $k = 65,6 \text{ мкм}^2$;
 2) після гідролізу $k = 40,5 \text{ мкм}^2$
 3) після оброблення HCl $k = 32,1 \text{ мкм}^2$

Співвідношення суміш (пісок: Mg = 8:2):
 пом'якшувач = 7:3
 1) $k = 1,14 \text{ мкм}^2$;
 2) після гідролізу $k = 0,72 \text{ мкм}^2$
 3) після оброблення HCl $k = 0,53 \text{ мкм}^2$

1 – гума (проникний каучук); 2 – непроникний (перфорований) латунний каркас

Рисунок 7 – Схеми дослідів із KBПТКО обводненої свердловини при $p_{об} = 4 \text{ МПа}$

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень проникності моделі тріщини, заповненої дисперсними матеріалами з різною плавучістю

Об'ємний вміст складових тампонуваної суміші в тріщині, %		Коефіцієнт проникності, мкм^2		
піщано-магнієвої суміші	пом'якшувача (або структуроутворювача)	за способом ізоляції з використанням піщано-магнієвої суміші	за запропонованими способами	
			ізоляція припливу	комплексне діяння
60	40	52,4	0,81	0,62
70	30	40,5	0,72	0,53
75	25	40,6	0,57	0,41
80	20	40,8	0,68	0,50
90	10	46,3	0,74	0,58

моксислотне оброблення (KBПТКО) (ізоляція та інтенсифікація із запомповуванням солянокислотного розчину) подано в таблиці 1.

Із результатів експериментів, поданих в таблиці, можна зробити висновок, що оптимальне співвідношення тампонуваної суміші становить 20-30% пом'якшувача (або структуроутворювача) і 70-80% піщано-магнієвої суміші, а найкраще відповідно 25% і 75%.

При співвідношенні 70% піщано-магнієвої суміші і 30% пом'якшувача (або структуроутворювача) в умовах способу із використанням для тампонування тріщини тільки суміші гранульованого магнію і піску (співвідношення пісок : магній рівне 8 : 2) коефіцієнт залишкової проникності становив $40,5 \text{ мкм}^2$, а коефіцієнт проникності ж піщано-магнієвої суміші разом із пом'якшувачем становив $0,72 \text{ мкм}^2$, тобто був меншим у 56,25 раз (див. рис. 7).

Після запомповування солянокислотного розчину за способом комплексного діяння коефіцієнт проникності не збільшився, а навіть дещо (в 1,36 разів) зменшився, що пов'язано із додатковою пластичною деформацією пом'якшувача у ході екзотермічної реакції кислоти із залишковим магнієм в моделі (див. рис. 7). У загальному коефіцієнт проникності зменшився в 76 разів. Таким чином, додавання

пом'якшувача (або структуроутворювача) до піщано-магнієвої суміші призводить до зниження залишкового коефіцієнта проникності тампона в тріщині при ізоляції припливу води в 56 разів, а при комплексному діянні (ізоляція води та інтенсифікація припливу солянокислотним розчином) – в 76 разів.

Висновки

Під час розробки нафтових родовищ при штучному водонапірному режимі виникають ускладнення внаслідок передчасного неконтрольованого прориву витіснювального агента по тріщинах пласта до видобувних свердловин. Запомповуванням суспензії дисперсного матеріалу досягається утворення тампонуального шару в тріщинах, але проникність тріщин залишається ще порівняно високою. На основі експериментального дослідження з теоретичним обґрунтуванням розроблено метод підвищення тампонуваної здатності дисперсної системи, якою заповнюються тріщини (рідинні ізоляційні матеріали проникають як у тріщини, так і в пори колектора), на основі використання суспензії суміші дисперсних систем із додатковою і від'ємною седиментаціями (інакше, плавучістю), зокрема суміші (перший компонент)

гранульованого магнію і піску (об'ємне співвідношення 20:80) та другого компонента – асфальтено-смолистого пом'якшувача чи бітумного структуроутворювача (об'ємне співвідношення із першим компонентом 30:70). Тоді при ізоляції припливу води коефіцієнт залишкової проникності зменшується в 56 разів, а при комплексному термохімічному діянні в 76 разів.

Література

- 1 Бойко В.С. Розробка та експлуатація нафтових родовищ: підручник / В.С. Бойко. – 4-те доповнене видання. – Київ: Міжнародна економічна фундація, 2008. – 448 с. ISBN 978-966-96506-6-5.
- 2 Закиров С.Н. Разработка газовых, газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений – Москва: Струна, 1998, – 628 с.
- 3 Бойко В.С. Технологія розробки нафтових родовищ: підручник, для студентів ВНЗ. – Івано-Франківськ: Нова Зоря, 2011. – 509 с.
- 4 Бойко В.С. Підземний ремонт свердловин: Підручник, для студентів ВНЗ, затверджений Міністерства освіти і науки України. – У 4-х частинах. Частина III. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – 809 с.
- 5 Обводнення газових і нафтових свердловин / В.С. Бойко, Р.В. Бойко, Л.М. Кеба, О.В. Семінський; за ред. В.С.Бойка. – У 3-х т. – Том 1. Технологічні матеріали і способи ізоляції. – Київ: Міжнародна економічна фундація, 2006. – 792 с.
- 6 Бойко В.С. Регулювання розробки газонафтових покладів шляхом запомповування керованих дисперсних систем / В.С. Бойко // Нафт. і газ. пром-сть. – 1992. – № 2. – С. 39-42.
- 7 Бойко В.С. Експериментальне вивчення процесу намівання зернистого шару у вертикальній тріщині / В.С. Бойко, І.М. Купер // Нафт. і газ. пром-сть. – 1993. – № 1. – С. 31-34.
- 8 Желтов Ю.В. Закрепление вертикальных трещин, образованных при гидравлическом разрыве пласта / Ю.В. Желтов // Новости нефтяной и газовой техники. Нефтепромысловое дело: Сб. статей. – М.: ГОСИНТИ, 1961. – №4. – С. 17-19.
- 9 Желтов Ю.В. Исследования по механизму образования и закрепления трещин при гидравлическом разрыве пласта: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.315. – М., 1961. – 14 с.
- 10 Желтов Ю.В. О закреплении песком трещин, образованных при гидроразрыве пласта / Ю.В. Желтов // Экспериментальные исследования в области разработки глубоких нефтяных и газовых месторождений. – М.: Наука, 1964. – С. 84-96. (Тр. ИГ и РГИ).
- 11 Експлуатація свердловин у нестійких колекторах: монографія / В.С. Бойко, І.А. Франчук, С.І. Іванов, Р.В. Бойко. – К.: Книгодрук, 2004. – 400 с.
- 12 Способ получения модели пласта с трещиной к исследованиям / В.С. Бойко, И.Н. Купер, Р.В. Грибовский. – Авт. свид. 1716559. МКИ G 09 В 23/40, Е 21 С 39/00. – №4691667/03; Заявлено 15.05.89; Зарегистр. 01.11.91; Опубл. 29.02.92. Бюл. № 8. – 1992.
- 13 Руководство по ограничению притока пластовых вод с применением гранулированного магния: РД 39-1-911-83 / Г.Д. Савенков, Ф.С. Абдулин, В.М. Дорошенко, Я.Б. Тарко, В.С. Бойко, Л.П. Гринкевич, В.И. Гусев, В.Г. Касянчук. – Миннефтепром СССР: Введ. 01.01.84. – 1982. – 45 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
29.08.13

Рекомендована до друку
професором **Коцкуlichem Я.С.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором **Зезекало І.Г.**

(ГО "Спілка наукових та інженерно-технічних фахівців «Прометей»", м. Полтава)